

2.3 位相キックバック

位相キックバックとは

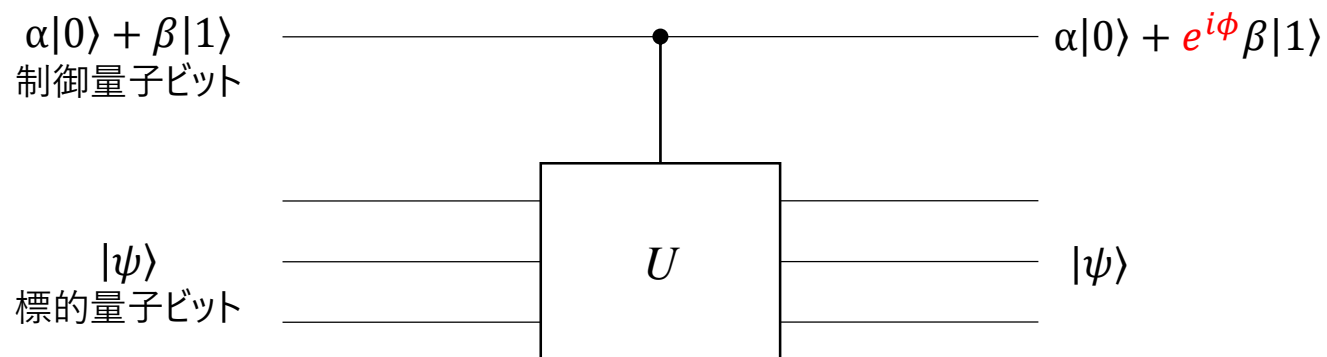
Qiskit textbookでは位相キックバックの簡単な例から紹介することで説明していますが、ここでは位相キックバックがどういうものをまず頭に入れるため、一般的な形から紹介します。

前提

あるユニタリー演算子 U に対して、固有状態 $|\psi\rangle$ と固有値 $e^{i\phi}$ が存在している。

$$U|\psi\rangle = e^{i\phi}|\psi\rangle$$

この固有状態 $|\psi\rangle$ を標的量子ビット、重ね合わせた量子ビット $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ を制御量子ビットとして制御ユニタリーゲートを作用させると、固有値 $e^{i\phi}$ が制御量子ビットの相対位相として現れる。
 このとき標的量子ビットの状態は変化しない。



この前提でtextbookの例を見ていきます。

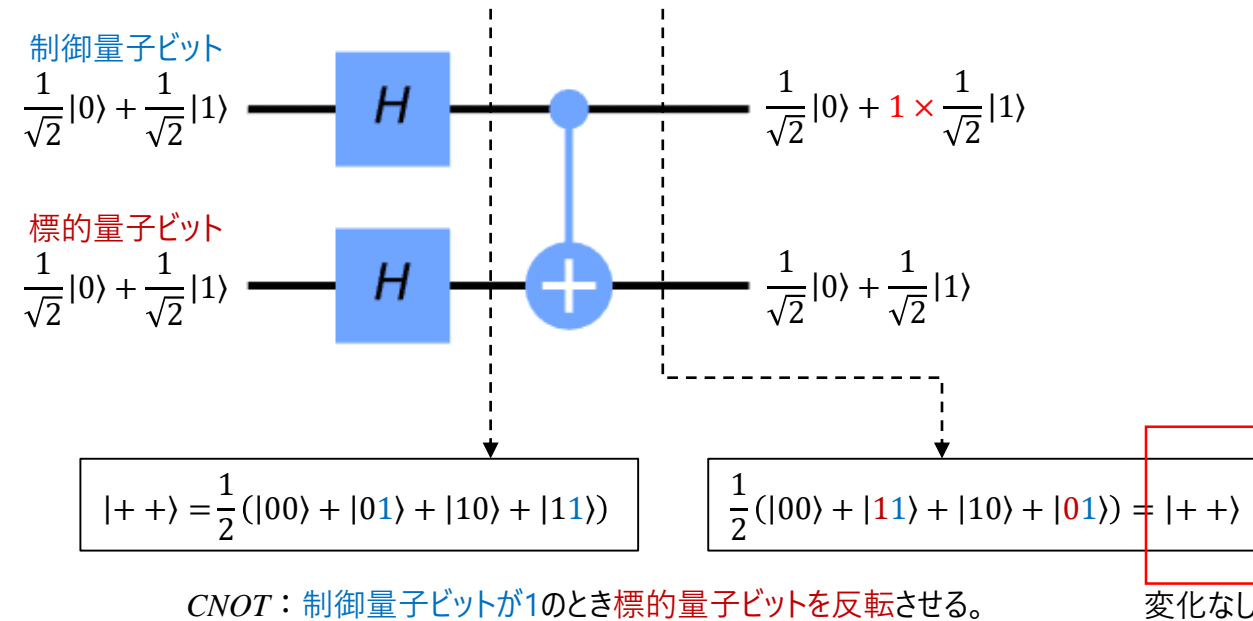
例1

ユニタリー演算子 $U = X$ (\because 制御ユニタリーゲートは $CNOT$)

固有状態 $|\psi\rangle = |+\rangle$

固有値は $X|+\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = |+\rangle$ となるので1

制御量子ビット $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle = |+\rangle$



固有値1の例だと何も変わりません。

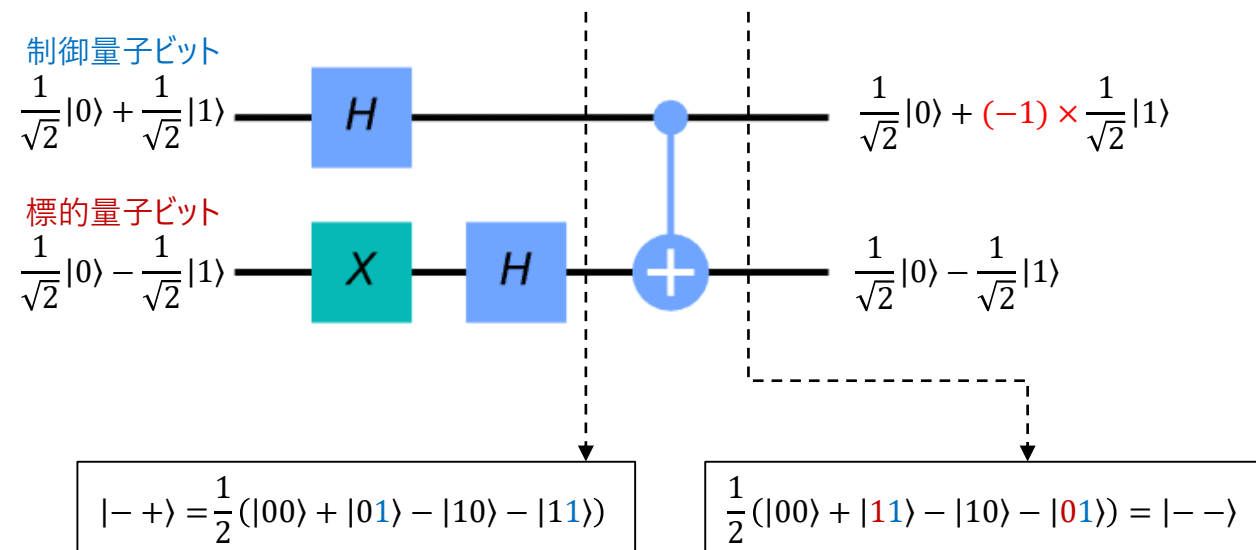
例2

ユニタリー演算子 $U = X$ (\because 制御ユニタリーゲートは $CNOT$)

固有状態 $|\psi\rangle = |-\rangle$

固有値は $X|-\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = -|-\rangle$ となるので -1

制御量子ビット $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle = |+\rangle$

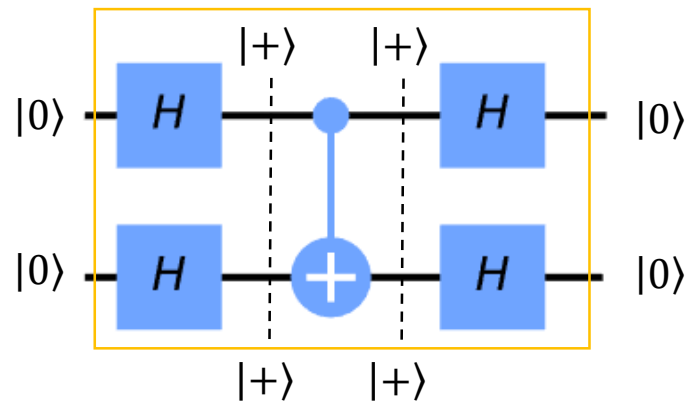


固有値-1の例では確かに標的量子ビットを変化させずに、固有値が制御量子ビットの位相に反映（キックバック）されています。

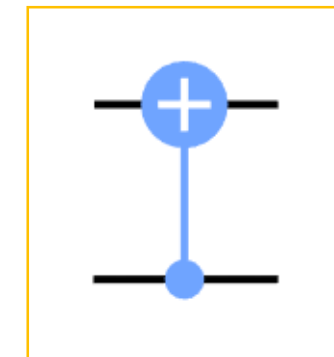
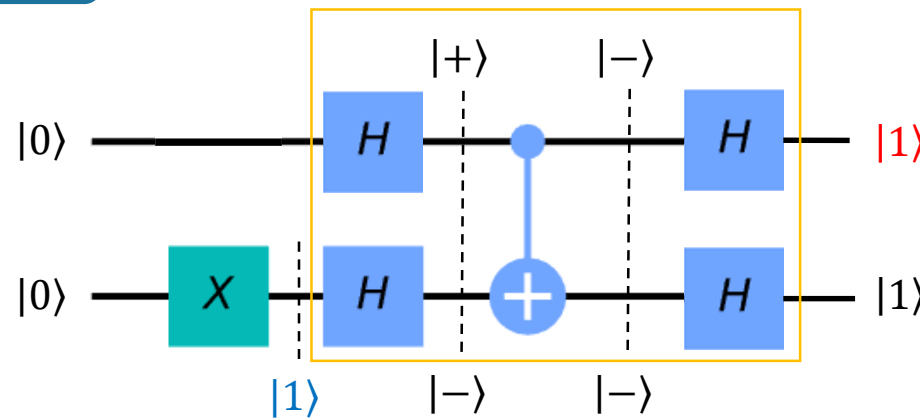
ゲートの等価性

例1,2の状態で、更にアダマールゲートを適用すると、最終的な結果はどうなるでしょうか。

例1



例2



橙色で囲われた部分のゲート操作の結果は、CNOTゲートの**制御量子ビットと標的量子ビットを入れ替えた結果**になっていることが分かります。Qiskitのプログラム上では簡単に制御量子ビットと標的量子ビットを入れ替えられますが、一部の量子コンピュータではハードウェア的に逆向きのCNOT操作は実行できないため、位相キックバックを応用して逆向きのCNOT操作を実現しています。このような複数のゲートの組み合わせで他のゲートの動きを再現する、量子ゲートの等価性を上手く利用して様々な量子ゲートが実装されています。

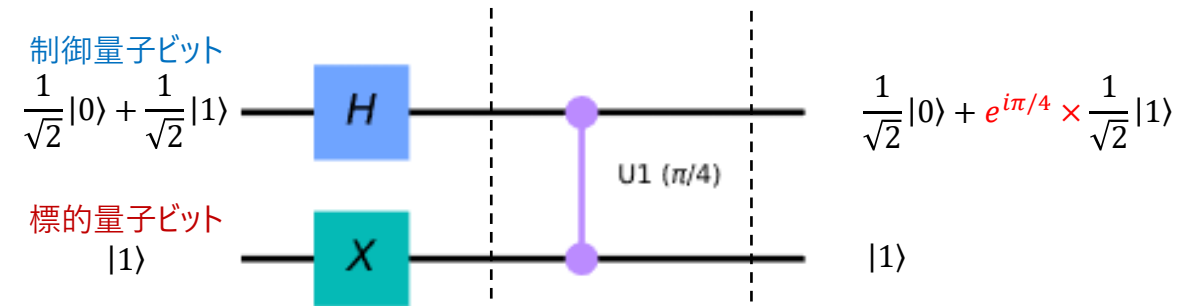
例3

ユニタリー演算子 $U = T$ (\because 制御ユニタリーゲートは *Controlled-T*)

固有状態 $|\psi\rangle = |1\rangle$

固有値は $T|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = e^{i\pi/4} |1\rangle$ となるので $e^{i\pi/4}$

制御量子ビット $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle = |+\rangle$



$$\begin{aligned} |1+\rangle &= |1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle + |11\rangle) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\pi/4} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ e^{i\pi/4} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle + e^{i\pi/4}|11\rangle) \\ &= |1\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + e^{i\pi/4}|1\rangle) \end{aligned}$$

本資料の著作権は、日本アイ・ビー・エム株式会社（IBM Corporationを含み、以下、IBMといいます。）に帰属します。ワークショップ、セッション、および資料は、IBMまたはセッション発表者によって準備され、それぞれ独自の見解を反映したものです。それらは情報提供の目的のみで提供されており、いかなる参加者に対しても法律的またはその他の指導や助言を意図したのではなく、またそのような結果を生むものでもありません。本資料に含まれている情報については、完全性と正確性を期するよう努力しましたが、「現状のまま」提供され、明示または暗示にかかわらずいかなる保証も伴わないものとします。本資料またはその他の資料の使用によって、あるいはその他の関連によって、いかなる損害が生じた場合も、IBMまたはセッション発表者は責任を負わないものとします。本資料に含まれている内容は、IBMまたはそのサプライヤーやライセンス交付者からいかなる保証または表明を引きだすことを意図したものでなく、IBMソフトウェアの使用を規定する適用ライセンス契約の条項を変更することを意図したものでなく、またそのような結果を生むものでもありません。

本資料でIBM製品、プログラム、またはサービスに言及していても、IBMが営業活動を行っているすべての国でそれらが使用可能であることを暗示するものではありません。本資料で言及している製品リリース日付や製品機能は、市場機会またはその他の要因に基づいてIBM独自の決定権をもっていつでも変更できるものとし、いかなる方法においても将来の製品または機能が使用可能になると確約することを意図したものではありません。本資料に含まれている内容は、参加者が開始する活動によって特定の販売、売上高の向上、またはその他の結果が生じると述べる、または暗示することを意図したものでなく、またそのような結果を生むものでもありません。パフォーマンスは、管理された環境において標準的なIBMベンチマークを使用した測定と予測に基づいています。ユーザーが経験する実際のスループットやパフォーマンスは、ユーザーのジョブ・ストリームにおけるマルチプログラミングの量、入出力構成、ストレージ構成、および処理されるワークロードなどの考慮事項を含む、数多くの要因に応じて変化します。したがって、個々のユーザーがここで述べられているものと同様の結果を得られると確約するものではありません。

記述されているすべてのお客様事例は、それらのお客様がどのようにIBM製品を使用したか、またそれらのお客様が達成した結果の実例として示されたものです。実際の環境コストおよびパフォーマンス特性は、お客様ごとに異なる場合があります。

IBM、IBM ロゴは、米国やその他の国におけるInternational Business Machines Corporationの商標または登録商標です。他の製品名およびサービス名等は、それぞれIBMまたは各社の商標である場合があります。現時点での IBM の商標リストについては、ibm.com/trademarkをご覧ください